

УДК 53.098; 532.612.4
PACS 47.65.Cb, 47.80.-v, 47.55.nb

Экспериментальное исследование поверхностного натяжения ферроколлоида в магнитном поле

К. А. Хохрякова, А. И. Шмырова, И. А. Мизёва, А. В. Шмыров

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Ак. Королёва, 1
email: bca@icmm.ru

Прямые измерения поверхностного натяжения, вязкости и поверхностной упругости в условиях действия внешних силовых полей зачастую не удается провести. Во многих задачах поверхностное натяжение магнитных жидкостей считается не зависящим от величины приложенного магнитного поля и определяется свойствами жидкости основы. Анизотропия магнитных свойств на поверхности раздела ввиду скачка намагниченности жидкости предполагает зависимость тензора поверхностных натяжений от магнитного поля. В данной работе предлагается новый экспериментальный способ исследования поверхностного натяжения магнитной жидкости во внешнем однородном магнитном поле, в зависимости от ориентации вектора напряженности относительно границы раздела жидкость-газ. Исследование проводилось с помощью модифицированного метода капиллярных волн в ортогональном к поверхности жидкости магнитном поле и методом отрыва кольца в случае продольного поля. Показано, что поверхностное натяжение жидкости основы ферроколлоида (керосина) не зависит ни от частоты возбуждения капиллярных волн, ни от приложенного к нему внешнего магнитного поля и соответствует значению, определенному на коммерческом тензиометре стандартным методом отрыва кольца. Обнаружено, что поверхностное натяжение феррожидкости снижается с ростом напряженности магнитного поля, ортогонального границе раздела, и ростом частоты акустических колебаний. Рост напряженности поля, продольно направленного границе раздела, приводит к росту поверхностного натяжения магнитной жидкости. Полученные в эксперименте результаты качественно согласуются с теоретическими предсказаниями А. В. Жукова: собственные значения тензора поверхностного натяжения монотонно возрастают с тангенциальной составляющей поля и монотонно убывают с увеличением его нормальной компоненты.

Ключевые слова: магнитная жидкость; поверхностное натяжение; интерферометрия; тензиометрия; магнитное поле; капиллярные волны.

Поступила в редакцию 15.05.2020; принята к опубликованию 16.06.2020

The experimental study of ferrocolloid surface tension in a magnetic field

C. A. Khokhryakova, A. I. Shmyrova, I. A. Mizeva, A. V. Shmyrov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
Acad. Korolev St. 1, 614013, Perm
email: bca@icmm.ru

Direct measurements of surface tension, viscosity and surface elasticity under the action of external

forces are often impossible. In many tasks, the magnetic fluid surface tension is considered to be independent of the magnitude of the applied magnetic field and is determined by the properties of the base fluid. The anisotropy of the magnetic properties at the interface due to the jump in the fluid's magnetization suggests the dependence of the surface tension tensor on the magnetic field. In this paper, we propose a new experimental method for studying the surface tension of a magnetic fluid in an external uniform magnetic field, depending on the orientation of the magnetic field intensity towards the liquid-gas interface. The study was carried out with the help of modified capillary wave method in a magnetic field orthogonal to the liquid surface and with the ring detachment method in the case of a longitudinal field. It was shown experimentally that the surface tension of a ferrocolloid fluid base (kerosene) does not depend either on the frequency of capillary waves excitation or on intensity of an applied external magnetic field, and corresponds to the value determined with the help of a commercial tensiometer by the standard method of ring detachment. The surface tension of the ferrofluid decreases with increasing intensity of the orthogonal magnetic field interface and with increasing frequency of acoustic vibrations. However, an increase in the field strength longitudinally directed to the interface, provokes an increase in the surface tension of the magnetic fluid. The experimental results are in qualitative agreement with theoretical predictions by A. V. Zhukov: the eigenvalues of the surface tension tensor monotonically increase with the tangential magnetic field component and monotonically decrease with an increase in its normal component.

Keywords: magnetic fluid; surface tension; interferometry; tensiometry; magnetic field; capillary waves.

Received 15.05.2020; accepted 16.06.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-56-64

1. Введение

Использование магнитных жидкостей (МЖ) в различных областях науки и техники зачастую основано на влиянии магнитного поля на межфазную границу с немагнитными средами. Эффекты смачивания и растекания на твердых поверхностях, а также корректный учет взаимодействия с другими несмешивающимися жидкостями в условиях деформации поверхности МЖ магнитным полем является важной прикладной задачей. В последнее время интерес к данному вопросу возрос в связи с широким применением МЖ в микрофлюидике [1]. Интересна данная задача и в феррогидродинамике, так как позволяет рассчитывать формы равновесных фигур, образуемых МЖ, вид которых определяется балансом магнитных сил и поверхностного натяжения [2].

В большинстве исследований поверхностное натяжение МЖ считается не зависящим от величины приложенного магнитного поля и определяется свойствами жидкости основы [3]. Однако теоретически было показано, что на границе раздела магнитная – немагнитная жидкость существует скачок намагниченности, физическая природа которого заключается в действии сил со стороны неоднородного в переходном слое магнитного поля на магнитные частицы [4]. В работе [5] были получены зависимости поверхностной намагниченности и тензора поверхностных натяжений от магнитного поля, которые продемонстрировали наличие анизотропии магнитных свойств поверхности раздела.

В работах [6, 7] была рассмотрена теоретическая модель структуры плоской межфазной поверхности на границе магнитной жидкости и несмешивающейся с ней обычной несжимаемой жидкости. Показано, что собственные значения тензора поверхностного натяжения монотонно возрастают с ростом тангенциальной составляющей магнитного поля и монотонно убывают с увеличением его нормальной компоненты.

Прямых экспериментальных исследований, посвященных измерению межфазного натяжения МЖ в магнитном поле, крайне мало. На сегодняшний день можно выделить два основных подхода: 1) определение длины волны зарождающейся пиковой неустойчивости свободной и межфазной поверхностей в ортогональном магнитном поле [8]; 2) сопоставление формы вытягивающейся в продольном поле капли МЖ с модельной [9, 10]. Указанные способы измерения основаны на достаточно большом изменении формы межфазной поверхности под действием внешнего магнитного поля. Последнее неизбежно приводит к перераспределению давления вдоль поверхности из-за локального искажения внешнего намагничивающего поля. В свою очередь, появление размагничивающего фактора капли, отличающейся по форме от сферы и эллипса, значительно усложняет расчетную задачу, так как вносит определенную долю неизвестности в реальную компоненту магнитной силы и приводит к росту погрешности в определении поверхностного натяжения.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования зависимости поверхностного натяжения МЖ от величины

напряженности и ориентации постоянного магнитного поля методом капиллярных волн [11, 12] и методом отрыва кольца [13]. Предложенные методы позволяют изучать свойства МЖ в магнитном поле, избегая трудностей, связанных с использованием коммерческого тензиометра. Применение последнего нежелательно ввиду наличия у него множества деталей из ферро- и парамагнитных материалов, что определенно влияет как на качество измерений, так и на последующую работу самого прибора.

Особенность метода капиллярных волн (МКВ) заключается в наложении периодических малоамплитудных возмущений немагнитной природы (акустической волны) и бесконтактной регистрации профиля субмиллиметровых цилиндрических капиллярных волн с помощью цифровой интерферометрии [12]. Данный метод позволяет избежать неустойчивости поверхности при докритических величинах ортогонального подмагничивающего поля и корректно учесть размагничивающий фактор при расчете магнитного давления (неустойчивость Розенцвейга [2]). В случае использования метода капиллярных волн амплитуда качания плоскости межфазной границы не превосходит по величине 0.1 градуса, что меньше амплитуды качания под действием фоновых вибрационных колебаний. Таким образом, характеристики возбуждаемой волны оказываются нечувствительны к прямому воздействию магнитного поля, что позволяет измерить свойства межфазной поверхности, взаимная ориентация вектора нормали к которой и вектора напряженности магнитного поля в процессе измерения не нарушается. Высокая пространственная чувствительность метода (динамический диапазон прибора 50 дБ), с одной стороны, позволяет с высокой степенью точности фиксировать профиль поверхности, но, с другой, определяет максимально допустимую величину деформации межфазной поверхности в 50 мкм на 1 см, ограничивая тем самым величину напряженности магнитного поля, достижимого в эксперименте ($H_{\perp} < 4.2$ кА/м). Для магнитной жидкости, использованной в эксперименте, это поле ниже критической величины напряженности, необходимой для возникновения неустойчивости Розенцвейга на поверхности, которая составляет $H_{\perp} \sim 10$ кА/м. Наложение периодических малоамплитудных возмущений немагнитной природы, используемое для генерации капиллярной волны, и применение цифровой интерферометрии позволяют сохранить геометрию плоского слоя в данном эксперименте.

2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились с коллоидным раствором магнетита, стабилизированного олеиновой кислотой, на основе керосина. Плотность МЖ составляла $\rho = 1.341$ г/см³, начальная магнитная вос-

приимчивость $\chi_0 = 6.7$, концентрация частиц $n = 1.58 \cdot 10^{23}$ 1/м³, параметр диполь-дипольного взаимодействия $\lambda = 1.1$, средний магнитный момент $\langle m \rangle = 3.25 \cdot 10^{-19}$ А·м², динамическая вязкость $\eta = 7.6$ мПа·с. Полученная методом дифференциальной прогонки [14] зависимость намагничивания от величины напряженности магнитного поля (рис. 1) позволила определить величину намагниченности насыщения $M_S = 51.6$ кА/м.

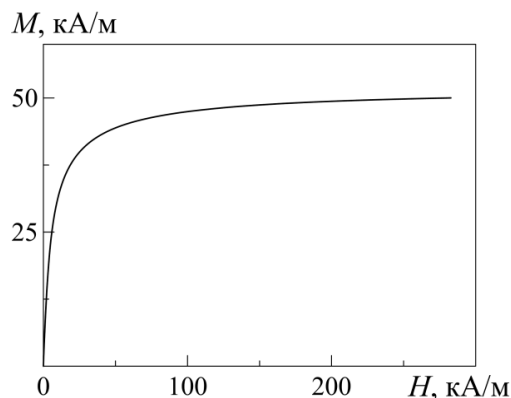


Рис. 1. Кривая намагничивания используемой в эксперименте магнитной жидкости

В ходе опыта МЖ заливалась в стеклянную ячейку диаметром 6 см с толщиной слоя 2–3 мм и помещалась в область однородного магнитного поля в центре системы двух кольцевых катушек радиусом $R = 8$ см и с числом витков $n = 298$, ориентированных симметрично относительно общей оси (система катушек Гельмгольца). Для выбранной ячейки относительная неоднородность поля, полученная обезразмериванием измеренной напряженности поля H в данной точке на величину H_{max} в центре катушек, не превышала 1% вдоль него и 1% в ортогональном направлении (рис. 2). Поворот оси симметрии катушек Гельмгольца относительно границы раздела жидкость – газ позволял менять угол между вектором напряженности и вектором нормали к поверхности.

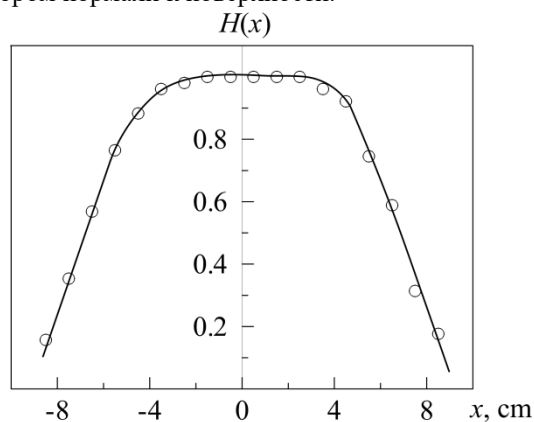


Рис. 2. Распределение относительной напряженности магнитного поля $H(x)$ в плоскости, нормальной к оси симметрии катушек Гельмгольца

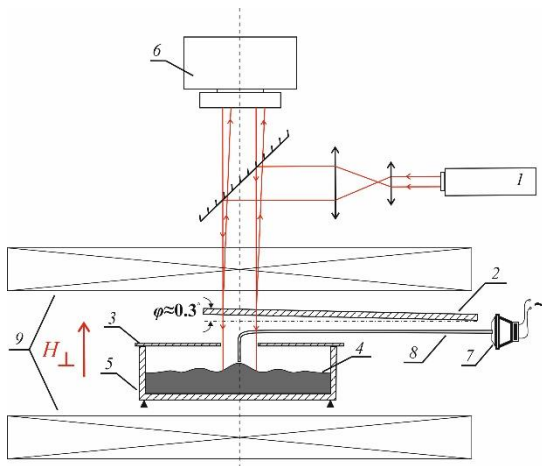


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – He-Ne лазер, 2 – плоскопараллельная стеклянная пластина, 3 – крышка кюветы, 4 – свободная поверхность магнитной жидкости, 5 – рабочая ячейка, 6 – видеокамера, 7 – источник звуковых колебаний, 8 – трубка-волновод, 9 – катушки Гельмгольца

2.1. Метод капиллярных волн

Измерение поверхностного натяжения МЖ в ортогонально направленном магнитном поле H_{\perp} осуществлялось с помощью МКВ [11, 12]. Этот метод был разработан для изучения прозрачных жидкостей немагнитной природы, поэтому в данных исследованиях экспериментальная установка была адаптирована для работы с непрозрачными средами с учетом влияния магнитного поля на ее структурные элементы (рис. 3).

Регистрация мгновенной карты рельефа межфазной поверхности проводилась методом оптической интерференции опорного и предметного пучков. Луч от He-Ne лазера 1, проходящий систему линз, преобразовывался в плоскопараллельный пучок диаметром ~ 1 см. Опорный пучок, имеющий плоский волновой фронт, формировался при отражении исходного пучка от плоскопараллельной стеклянной пластины 2. Предметный пучок проходил сквозь пластину 2 и крышку кюветы 3, отражался от свободной поверхности МЖ 4, заполняющей рабочую ячейку 5, и интерферировал с опорным на матрице видеокамеры 6 (Baumer TXG50, Германия). Изображение с камеры передавалось на персональный компьютер, где в режиме реального времени с помощью программного пакета IntelliWave (Mahr GmbH, Германия) осуществлялись расшифровка интерферограмм и восстановление формы волнового фронта.

Положение плоскопараллельной стеклянной пластины 2 настраивалось таким образом, чтобы ее поверхность и свободная поверхность жидкости образовывали между собой угол $\sim 30^\circ$. Последнее позволяет наблюдать деформации границы раздела

в полосах равной толщины. Такой подход дает возможность применить метод пространственного сдвига фаз для восстановления рельефа свободной поверхности с высокой степенью точности.

Капиллярные волны на свободной поверхности МЖ возбуждались акустическими колебаниями в диапазоне частот 150–400 Гц от миниатюрного динамика 7, который был подключён к генератору синусоидальных колебаний. Для локализации воздействия упругих волн от механически колеблющейся мембраны динамика использовалась медная трубка-волновод 8 с керамическим наконечником, который подводился к границе раздела на расстояние порядка 0.1 мм. Длина волновода 8 подбиралась таким образом, чтобы динамик располагался за пределами катушек Гельмгольца для уменьшения влияния магнитного поля на частоту колебаний мембраны.

Поскольку МЖ изготовлена на основе керосина, смеси летучих жидких углеводородов, то для предотвращения испарения жидкости основы и стабилизации физико-химических свойств коллоида на время проведения измерений в работе использовалась крышка – тонкое предметное стекло 3, не вносящее искажения в интерференционную картину. В центре стекла для ввода трубки-волновода и регистрации интерференционной картины было высверлено отверстие диаметром ~ 10 мм.

Полученные в ходе экспериментов профили поверхности после предварительной обработки в IntelliWave аппроксимировались уравнением цилиндрической волны в пакете Mathematica 9.0 [11, 12], что позволяло определить волновое число k и коэффициент затухания пространственных возмущений границы раздела β , характеризующий поверхностную реологию межфазной границы [12]. Далее поверхностное натяжение σ определялось по формуле Кельвина [15]

$$\sigma = \frac{\rho}{k^3} (\omega^2 - gk), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – угловая частота акустических колебаний; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения. Измерения проводились при температуре окружающего воздуха $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Поскольку при одинаковом значении H_{\perp} и H_{\parallel} , межфазная поверхность в продольном поле деформируется гораздо сильнее, чем в поперечном, а разрешающая способность интерферометра определяется пределом Найквиста и ограничивает его использование случаем малой деформации поверхности, то изучение влияния магнитного поля на поверхностное натяжение МЖ при продольной ориентации вектора напряженности (H_{\parallel}) относительно границы раздела МЖ-газ проводилось с помощью менее чувствительного к таким возмущениям метода отрыва кольца.

2.2. Метод отрыва кольца

Измерение поверхностного натяжения МЖ в продольном магнитном поле H_{\parallel} осуществлялось с помощью метода отрыва кольца. Данный метод основан на извлечении погружаемого тела из жидкости и измерении веса вытягиваемого с ним мениска [13].

В качестве погружаемого тела в работе была использована медная пластина толщиной 0.03 мм и длиной 40 см, свернутая в кольцо и пропаянная в верхней части образовавшегося цилиндра, чтобы избежать неравномерного смачивания при погружении в жидкость. Медное кольцо на нерастяжимой нити из нихромовой проволоки толщиной 0.02 мм подвешивалось к лабораторным высокоточным аналитическим весам типа ВесТа АВ I (ОКБ Веста, Россия) с точностью измерений до 0.001 г. Чтобы удалить измеряющий блок (аналитические весы) от источника магнитного поля (катушек) была использована нить подвеса для медного кольца длиной ~30 см. Испытания весов без нагрузки в магнитном поле показали, что при такой геометрии используемые катушки не оказывают влияния на результаты измерений, которые проводились при температуре окружающего воздуха (27 ± 1)°C.

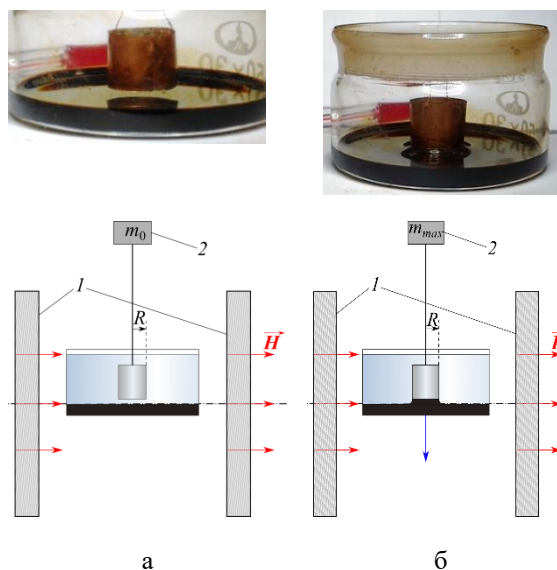


Рис. 4. Общий вид и схема экспериментальной установки по измерению поверхностного натяжения методом отрыва кольца: 1 – катушки Гельмгольца, 2 – аналитические весы

На первом этапе эксперимента, когда кольцо находилось вне жидкости (рис. 4, а), показания весов обнулялись. Затем емкость с жидкостью перемещалась вверх по направлению к кольцу до момента касания им поверхности жидкости. Измеряемый в этот момент вес уменьшался из-за действующей на кольцо силы Архимеда. Погружение кольца в объемную фазу продолжалось до

полного его смачивания – исходная позиция в эксперименте. Далее ячейка с МЖ медленно опускалась относительно начального положения, что приводило к вытягиванию цилиндра из жидкости с постоянной скоростью. При этом вместе с погружаемым телом над границей раздела вытягивался жидкий мениск, что вызывало рост веса кольца. По мере увеличения объема жидкого мениска измеряемая сила достигала максимума (рис. 4, б), а при истончении мениска начинала уменьшаться. Дальнейшее вытягивание цилиндра приводило к разрыву мениска. Максимальное усилие при подъеме цилиндра определяло значение m_{\max} , а вес кольца с остатками на нем МЖ – m_0 . Поскольку сила поверхностного натяжения по определению равна максимальному весу кольца при его вытягивании из жидкости, то величины m_{\max} и m_0 можно использовать для расчета поверхностного натяжения в соответствии с уравнением:

$$\sigma = \frac{(m_{\max} - m_0)g}{4\pi R}, \quad (2)$$

где m_{\max} – максимальная масса кольца вместе с мениском жидкости, m_0 – масса кольца до/после отрыва, g – ускорение свободного падения, R – радиус кольца.

Для оценки погрешности выбранного метода были проведены измерения поверхностного натяжения МЖ при $H_{\parallel} = 0$. Полученные данные сравнивались с независимыми измерениями, проведенными на коммерческом тензиометре Sigma 701 (KSV Instruments Ltd., Финляндия) при заданной температуре. Сопоставление показало согласованность результатов в пределах погрешности методов.

3. Результаты

На рис. 5, а приведены результаты измерения поверхностного натяжения σ методом капиллярных волн при фиксированной частоте возбуждения $\nu = 290$ Гц в зависимости от напряженности ортогонально направленного магнитного поля H_{\perp} в диапазоне, при котором не формируется неустойчивость Розенцвейга. Из графика видно, что с ростом поля поверхностное натяжение МЖ, рассчитанное по формуле Кельвина, убывает на 15% по линейному закону до значения 20.8 мН/м. Данное явление необъяснимо с физической точки зрения, поскольку все возможные механизмы, протекающие на границе раздела, должны приводить к изменению поверхностного натяжения на проценты [6, 7].

Исследование влияния частоты генерации капиллярных волн на значения поверхностного натяжения МЖ и жидкости основы – керосина как при наличии магнитного поля, так и в его отсутствие (рис. 5, б) показало, что σ среды, не облада-

ющей магнитными свойствами (керосин), которое рассчитано по формуле (1), не зависит от ν , наличия магнитного поля и в пределах погрешности сопоставимо со значением σ , полученном на тензиометре Sigma 701. Растущее же влияние частоты на значение σ МЖ при неизменных внешних условиях может свидетельствовать о том, что либо в измерениях не достигнут динамический диапазон частот, при котором значения поверхностного натяжения не подвержены систематическим погрешностям, либо расчет σ осуществлен некорректно. В работах [11, 12] показано, что поверхностное натяжение, которое получено методом капиллярных волн при частотах, лежащих за пре-

делами динамического диапазона, имеет вид возрастающей функции. В нашем же случае в отсутствие магнитного поля σ МЖ падает с ростом ν . Таким образом, убывающее значение σ свидетельствует о необоснованности использования формулы (1) при расчете поверхностного натяжения МЖ в данной задаче.

В работе [16] показано, что в случае вязких жидкостей в дисперсионном соотношении, связывающем поверхностное натяжение и волновой вектор, необходимо учитывать влияние динамической вязкости среды η на скорость распространения капиллярных волн. Аналогичным образом необходимо учесть и влияние магнитного поля на свой-

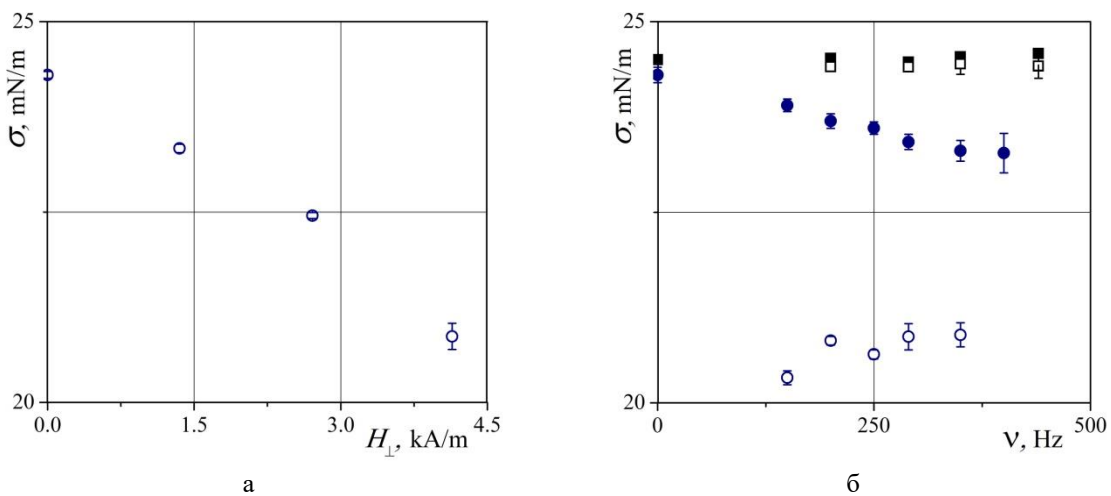


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения, рассчитанная по формуле (1): а – МЖ от напряженности ортогонально направленного магнитного поля H_{\perp} при частоте возбуждения капиллярных волн $\nu = 290$ Гц ; б – от частоты возбуждения капиллярных волн ν ■ – керосин, ● – МЖ в отсутствие магнитного поля; □ – керосин, ○ – МЖ в магнитном поле ($H_{\perp} = 4.14$, кА/м)

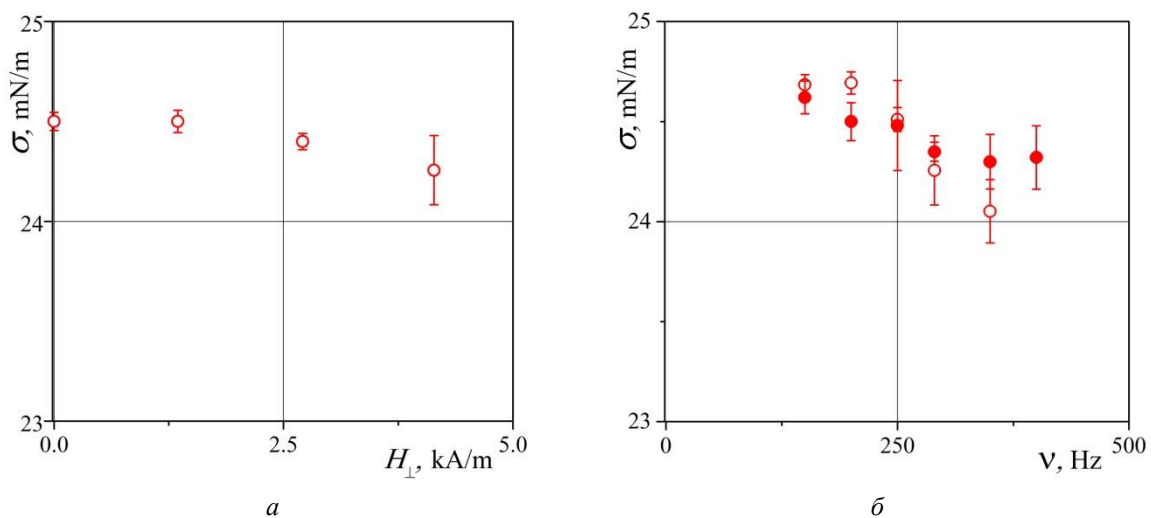


Рис. 6. Зависимость поверхностного натяжения, рассчитанного по формуле (3): а – МЖ от напряженности ортогонально направленного магнитного поля H_{\perp} при частоте возбуждения капиллярных волн $\nu = 290$ Гц; б – от частоты возбуждения капиллярных волн ν ● – в отсутствие магнитного поля; ○ – в магнитном поле ($H_{\perp} = 4.14$ кА/м)

ства межфазной поверхности при работе с магнитными средами [17], что, в конечном счете, преобразует формулу (1) в выражение

$$\sigma = \frac{\rho}{k^3}(\omega^2 - gk) + \frac{\mu_0 H^2}{k} \frac{\chi^2}{(1 + \chi_0)(2 + \chi_0)} + \sqrt{\frac{8\omega\eta^3}{\rho} - \frac{4k\eta^2}{\rho}}, \quad (3)$$

использование которого позволило получить зависимости $\sigma(H_{\perp})$ и $\sigma(v)$ (рис. 6).

Относительное изменение величины поверхностного натяжения с ростом параметров не превышает 1%, а абсолютная величина σ сохраняет тенденцию к уменьшению.

На рис. 7 представлена экспериментально определенная зависимость поверхностного натяжения магнитной жидкости от напряженности продольного магнитного поля H_{\parallel} , полученная методом отрыва кольца. Из графика видно, что рост напряженности поля приводит к увеличению межфазного натяжения жидкость-газ. Относительное изменение величины при этом также не превышает 1%.

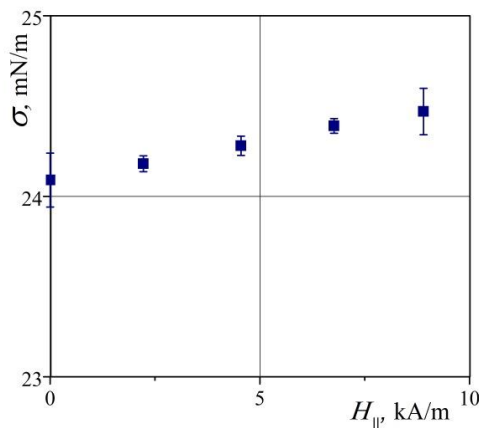


Рис. 7. Зависимость поверхностного натяжения МЖ, рассчитанного по формуле (2), от напряженности продольно направленного магнитного поля H_{\parallel}

4. Заключение

Несмотря на множество теоретических и численных работ [1, 4–10], посвященных решению вопросов о зависимости поверхностного и межфазного натяжения МЖ от величины и ориентации магнитного поля, на сегодняшний день крайне мало прямых экспериментальных исследований ввиду невозможности использования существующих коммерческих тензиометров в магнитных полях. Состав ферроколлоида является еще одним осложняющим фактором. Во-первых, наличие в жидкости частиц магнитного вещества приводит к тому, что внешние магнитные поля влияют не только на

объемные, но и на поверхностные свойства материала. Это, в свою очередь, может оказать влияние на скорость распространения капиллярных волн на межфазной поверхности и привести к изменению волнового числа с ростом частоты генерации акустических колебаний. Зависимость σ от частоты показывает, что в расчетах по относительно простой формуле (3) не учитываются неньютоновские свойства исследуемой жидкости, которые могут быть связаны как с ее коллоидной природой, так и с возникновением диполь-дипольного взаимодействия частиц магнетита. В пользу последнего механизма свидетельствует то, что зависимость $\sigma(v)$ ярче выражена при наличии магнитного поля (рис. 6, б). Убывающий вид зависимости свидетельствует о том, что эффективная объемная вязкость среды растет с частотой возбуждаемой волны, а значит, зависит от величины сдвиговых вязких напряжений, возникающих на поверхности. В дальнейшем необходим корректный учет этого эффекта при исследовании поверхностных свойств МЖ как методом капиллярных волн, так и любым другим динамическим методом.

Во-вторых, наличие в жидкости молекул вещества стабилизатора (ПАВ) может приводить не только к изменению объемной вязкости МЖ, но и к формированию адсорбционного слоя с отличающимися физико-химическими свойствами, что также необходимо учитывать при оценке σ .

Применение метода отрыва кольца при исследовании свойств межфазной поверхности в случае продольно направленного магнитного поля H_{\parallel} также может оказывать влияние на абсолютное значение σ , поскольку в процессе вытягивания цилиндра нарушается взаимная ориентация вектора нормали поверхности и вектора напряженности магнитного поля. Однако для качественного сравнения с существующими теоретическими результатами наиболее важна величина относительного изменения σ , которая в нашем случае хорошо согласуется с теорией [7].

Использование интерференционного метода в условиях действия продольного поля также возможно, однако требует доработки экспериментальной установки. Дальнейшая работа будет направлена на модернизацию экспериментальной установки метода капиллярных волн с целью использования последней для контроля и проверки полученных данных.

Результаты работы, безусловно, нуждаются в дальнейшей проработке в виде систематического исследования, сопровождаемого значительным перебором параметров эксперимента, а также в количественном сравнении получаемых данных с результатами существующих на данный момент теоретических моделей. Несмотря на это полученные в эксперименте результаты качественно согласуются с теоретическими предсказаниями: поверхностное натяжение монотонно возрастает с

увеличением тангенциальной составляющей поля и монотонно убывает с увеличением его нормальной компоненты [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-01-00648 А.

Список литературы

1. Latikka M., Backholm M., Timonen J., Ras R. Wetting of ferrofluids: Phenomena and control // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2018. Vol. 36. P. 118–129. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.04.003
2. Rosensweig R. E., Zahn M. Stability of magnetic fluid penetration through a porous medium with uniform magnetic field oblique to the interface // *IEEE Trans. Magnetics*. 1980. No. 2. P. 275–282. DOI: 10.1109/TMAG.1980.1060586
3. Фертман В. Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 184 с.
4. Bashtovoi V. G., Taits E. M. Some effects associated with the discontinuity of magnetization at the interface between magnetic liquids // *Magneto-hydrodynamics*. 1985. Vol. 21. N. 2. P. 148–153.
5. Golubyatnikov A. N., Subkhankulov G. I. Surface tension of a magnetic liquid // *Magneto-hydrodynamics*. 1986. Vol. 22. N. 1. P. 62–66.
6. Жуков А. В. Структура и устойчивость границы раздела магнитной и обычной жидкостей. Модель трехкомпонентной среды // *Изв. РАН. МЖГ*. 2013. № 5. С. 37–51.
7. Жуков А. В. Структура границы раздела магнитной и обычной жидкостей. Модель несмещающихся фаз // *Изв. РАН. МЖГ*. 2016. № 1. С. 18–28.
8. Amin M. S., Elborai S., Lee S.-H., He X., Zahn M. Surface tension measurement techniques of magnetic fluids at an interface between different fluids using perpendicular field instability // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 97, 10R308. DOI: 10.1063/1.1861374
9. Sudo S., Hashimoto H., Ikeda A. Measurements of the surface tension of a magnetic fluid and interfacial phenomena // *JSME Int. J.* 1989. Vol. 32, Is. 1. P. 47–51. DOI: 10.1299/jsmeb1988.32.1_47
10. Afkhami S., Tyler A. J., Renardy Y., Renardy M., Pierre T. G. St., Woodward R. C., Riffe J. S. Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields // *J. Fluid Mech.* 2010. Vol. 663. P. 358–384. DOI: 10.1017/S0022112010003551
11. Шмырова А. И., Мизёва И. А., Артамонова П. А. Модификация метода капиллярных волн // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. № 3 (41). С. 32–38. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-3-32-38
12. Shmyrov A., Mizev A., Shmyrova A., Mizeva I. Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction // *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31, 012101. DOI: 10.1063/1.5060666
13. Русанов А. И., Прохоров В. А. Межфазная тензиометрия. А. СПб.: Химия, 1994. 397 с.
14. Lebedev A. V. Calculating the magnetization curves of concentrated magnetic fluids // *Magneto-hydrodynamics*. 1989. Vol. 25. N. 4. P. 520–523.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
16. Behroozi F., Smith J., Even W. Stokes' dream: Measurement of fluid viscosity from the attenuation of capillary waves // *Am. J. Phys.* 2010. Vol. 78. N. 11. P. 1165–1169. DOI: 10.1119/1.3467887
17. Browaeys J., Perzynski R., Bacri J.-C., Shliomis M. I. Capillary-gravity wave resistance in ordinary and magnetic fluids // *Eur. Phys. Lett.* 2001. Vol. 53. N. 2. P. 209–215. DOI: 10.1209/epl/i2001-00138-7

References

1. Latikka M., Backholm M., Timonen J., Ras R. Wetting of ferrofluids: Phenomena and control *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 36, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.04.003
2. Rosensweig R. E., Zahn M. Stability of magnetic fluid penetration through a porous medium with uniform magnetic field oblique to the interface. *IEEE Trans. Magnetics*, 1980, no. 2, pp. 275–282. DOI: 10.1109/TMAG.1980.1060586
3. Fertman V. E. *Magnetic Fluids Guidebook*. CRC Press, 1990. 146 p.
4. Bashtovoi V. G., Taits E. M. Some effects associated with the discontinuity of magnetization at the interface between magnetic liquids. *Magneto-hydrodynamics*, 1985, vol. 21, no. 2, pp. 148–153.
5. Golubyatnikov A. N., Subkhankulov G. I. Surface tension of a magnetic liquid. *Magneto-hydrodynamics*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 62–66.
6. Zhukov A. V. Structure and stability of the interface between magnetic and conventional fluids. Model of a three-component medium. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 599–611. DOI: 10.1134/S0015462813050049
7. Zhukov A. V. Structure of the interface between magnetic and conventional fluids: Model of immiscible phases. *Fluid Dynamics*, 2016, vol. 51, no. 1, pp. 18–28. DOI: 10.1134/S0015462816010038
8. Amin M. S., Elborai S., Lee S.-H., He X., Zahn M. Surface tension measurement techniques of magnetic fluids at an interface between different fluids using perpendicular field instability. *J. Appl. Phys.* 2005, vol. 97, 10R308. DOI: 10.1063/1.1861374

9. Sudo S., Hashimoto H., Ikeda A. Measurements of the surface tension of a magnetic fluid and interfacial phenomena *JSME Int. J.*, 1989, vol. 32, no. 1, pp. 47–51. DOI: 10.1299/jsmeb1988.32.1_47
10. Afkhami S., Tyler A. J., Renardy Y., Renardy M., Pierre T. G. St., Woodward R. C., Riffle J. S. Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields *J. Fluid Mech.*, 2010, vol. 663, pp. 358–384. DOI: 10.1017/S0022112010003551
11. Shmyrova A. I., Mizeva I. A., Artamonova P. A. Capillary waves modified technique. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 3 (41), pp. 32–38. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-3-32-38
12. Shmyrov A., Mizev A., Shmyrova A., Mizeva I. Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, 012101. DOI: 10.1063/1.5060666
13. Rusanov A. I., Prokhorov V. A. *Interfacial Tensimetry*. Elsevier Science, 1996. 397 p.
14. Lebedev A. V. Calculating the magnetization curves of concentrated magnetic fluids. *Magneto-hydrodynamics*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 520–523.
15. Landau L. D., Lifschitz E. M.. *Fluid Mechanics*. Vol. 6. Pergamon Press, 1959.
16. Behroozi F., Smith J., Even W. Stokes' dream: Measurement of fluid viscosity from the attenuation of capillary waves. *Am. J. Phys.*, 2010, vol. 78, no. 11, pp. 1165–1169. DOI: 10.1119/1.3467887
17. Browaeysyz J., Perzynski R., Bacri J.-C., Shliomis M. I. Capillary-gravity wave resistance in ordinary and magnetic fluids. *Eur. Phys. Lett.* 2001. vol. 53, no. 2, pp. 209–215. DOI: 10.1209/epl/i2001-00138-7

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хохрякова К. А., Шмырова А. И., Мизёва И. А., Шмыров А. В. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения ферроколлоида в магнитном поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. Вып. 3. С. 56–64. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-56-64

Please cite this article in English as:

Khokhryakova C.A. Shmyrova A.I., Mizeva I.A., Shmyrov A.V. The experimental study of ferrocolloid surface tension in a magnetic field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 3. pp. 56–64. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-56-64